

## Recomendaciones de seguridad para la IRM en la práctica clínica

### Safety recommendations for MRI in clinical practice

Sergio Enrique Solís Nájera<sup>1</sup>, Alfredo Odón Rodríguez<sup>\*,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, CdMx 04510.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, UAM Iztapalapa, CdMx 09340, México.

#### Resumen

La Imagenología por Resonancia Magnética (IRM) se ha consolidado como una herramienta diagnóstica fundamental en la medicina moderna. Sin embargo, su implementación clínica exige que los profesionales y técnicos enfrenten situaciones que requieren decisiones críticas, las cuales impactan tanto en la seguridad del paciente como en la calidad del estudio. A diferencia de otras modalidades de imagenología médica, la IRM presenta criterios y lineamientos específicos debido a su dependencia de campos electromagnéticos intensos, lo que obliga a priorizar: la protección del paciente y del personal expuesto ocupacionalmente y la obtención de imágenes de alta calidad diagnóstica. Hasta la fecha, solo se han establecido criterios generales de seguridad en IRM, lo que subraya la necesidad de analizar aspectos clave en su práctica clínica y ofrecer recomendaciones para su uso adecuado. Entre los principales efectos a considerar destacan: a) campo magnético estático generado por el imán, b) sistema de radiofrecuencia: bobinas de gradiente y de RF, c) interacciones con dispositivos (activos y pasivos), d) agentes de contraste y sus consideraciones, e) ruido acústico generado durante el examen y f) consideraciones en pacientes embarazadas. Además, se revisan las zonas de control dentro de la sala de IRM, el etiquetado de equipos periféricos y otros protocolos de seguridad. Con base en este análisis, se proponen recomendaciones prácticas para optimizar la seguridad en el entorno clínico, garantizando tanto la protección del paciente como la eficacia diagnóstica.

**Palabras clave:** Imagenología por resonancia magnética, seguridad, tasa de absorción de energía, efectos fisiológicos, agente de contraste.

#### Abstract

Magnetic resonance imaging (MRI) has established itself as a fundamental diagnostic tool in modern medicine. However, its clinical implementation requires professionals and technicians to face situations requiring critical decisions, impacting both patient safety and study quality. Unlike other medical imaging modalities, MRI requires specific criteria and guidelines due to its dependence on intense electromagnetic fields, which requires prioritizing the protection of patients and occupationally exposed personnel, and obtaining high-quality diagnostic images. To date, only general MRI safety criteria have been established, underscoring the need to analyze key aspects of MRI in clinical practice and offer recommendations for its appropriate use. The main effects to be considered include: a) static magnetic field generated by the magnet, b) radiofrequency system: gradient and RF antennas, c) interactions with devices (active and passive), d) contrast agents and their considerations, e) acoustic noise generated during the exam, and f) considerations for pregnant patients. In addition, the control zones within the MRI room, the labeling of peripheral equipment, and other safety protocols are reviewed. Based on this analysis, practical recommendations are proposed to optimize safety in the clinical environment, ensuring both patient protection and diagnostic efficacy.

**Key words:** Magnetic resonance imaging, safety, energy absorption rate, physiological effects, contrast agent.

\*Correspondencia: arog@xanum.uam.mx

<https://doi.org/10.37004/sefm/2026.27.1.001>

Fecha de Recepción: 30/04/2025 - Fecha de Aceptación: 13/11/2025

Fecha de publicación online: 13/04/2026

© 2026 Sociedad Española de Física Médica. Publicado por ADI Servicios Editoriales. Reservados todos los derechos.

## 1. Introducción

La imagenología por resonancia magnética (IRM) es una herramienta esencial para el diagnóstico temprano y preciso, al ofrecer información anatómica y funcional sin recurrir a radiación ionizante, a diferencia de técnicas como la tomografía computarizada o por emisión de positrones.<sup>1-2</sup> En las últimas décadas, la IRM ha avanzado notablemente en velocidad de adquisición, capacidad diagnóstica y facilidad de uso. Aunque su costo es elevado, principalmente por el imán superconductor, su adopción se ha extendido globalmente.<sup>2-3</sup> La seguridad del paciente en IRM es crítica debido al uso de campos magnéticos intensos y ondas de radiofrecuencia. Para garantizar un entorno seguro, se requiere una preparación adecuada, evaluación médica previa y el cumplimiento estricto de normativas. La formación continua del personal y la comunicación con el paciente son claves para minimizar riesgos. Un enfoque integral en seguridad contribuye a un diagnóstico más efectivo y seguro. Es importante que los profesionales comprendan los fundamentos físicos de la IRM para identificar y mitigar riesgos. La falta de regulación en instalación y operación puede afectar la calidad diagnóstica, aumentar riesgos para el personal y reducir la disponibilidad

de los equipos, ya que las guías de fabricantes no son vinculantes ni determinan los flujos clínicos. El sistema de IRM combina un campo magnético intenso, antenas de radiofrecuencia, bobina de gradientes, sistemas mecánicos para el manejo del paciente y electrónica para el procesamiento de imágenes.<sup>4-5</sup> Los riesgos asociados difieren de los de otras modalidades radiológicas,<sup>6-9</sup> lo que ha llevado al desarrollo de normativas específicas en EE. UU. y Europa.<sup>10</sup> Este artículo revisa aspectos clave de la seguridad en IRM, abordando: a) campo magnético estático: interacción con objetos ferromagnéticos, implantes y efectos fisiológicos, b) antenas de radiofrecuencia: riesgos por corrientes inducidas y calentamiento tisular. c) bobinas de gradiente: efectos adversos potenciales, d) zonas de seguridad: correcta señalización y control de acceso, e) agentes de contraste: beneficios diagnósticos y reacciones adversas, f) ruido acústico: efectos y estrategias de mitigación, g) embarazo: protocolos y precauciones específicas. La seguridad en IRM requiere un equilibrio entre tecnología, protocolos estandarizados e infraestructura adecuada. Una gestión proactiva de riesgos permite optimizar resultados y proteger tanto a pacientes como a profesionales. La Fig. 1 muestra una visión esquemática de los factores involucrados en este proceso.



**Fig. 1.** Esquema simplificado de la seguridad en IRM y sus efectos producidos por el imán superconductor,<sup>11-13</sup> las antenas compensadoras de la uniformidad del campo estático, las bobinas de gradiente de campo magnético<sup>14-15</sup> y antenas de RF del tipo jaula de pájaro.<sup>16-17</sup> En cada caso también se anotan los efectos que se producen durante su funcionamiento para adquirir la imagen, y otros factores como el ruido acústico, agentes de contraste y embarazo.

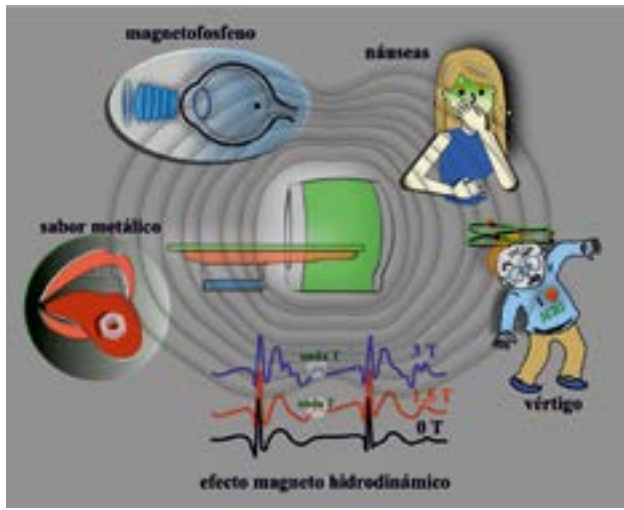
## 2. Campo magnético: imán permanente

### A. Efectos fisiológicos

Iniciamos nuestro estudio con el campo magnético estático  $B_0$  que es el más costoso y se genera mediante un imán superconductor o permanente, variando entre 30 mT y 11.7 T para uso humano. En sistemas de 3 T, comúnmente usados en la práctica clínica, la intensidad del imán es 66,000 veces mayor que el campo magnético terrestre (30-70  $\mu$ T).<sup>18</sup> Es importante aclarar que no se está haciendo referencia a un imán para todos los sistemas clínicos de IRM. En el caso de aquellos sistemas que generan el campo magnético  $B_0$  mediante una bobina superconductor, no se trata de un imán propiamente dicho. Sin embargo, de manera coloquial, el término imán superconductor ha sido adoptado y utilizado ampliamente.

La alta intensidad de  $B_0$  plantea preocupaciones sobre los efectos fisiológicos tanto para pacientes como para el personal médico.<sup>9,11,14</sup> Aunque no se ha demostrado daño permanente, se han realizado evaluaciones exhaustivas debido al aumento en la intensidad del campo para aplicaciones clínicas y de investigación.<sup>19</sup>

Los efectos sensoriales del campo magnético intenso se dividen en dos mecanismos principales:<sup>11,20</sup>



**Fig. 2.** Efectos de un campo magnético intenso  $B_0$ : En el centro de la ilustración se muestra el imán superconductor que genera el campo magnético estático, rodeado por las líneas isogauss ( $B_0$ ) representadas en gris. El incremento de la onda T en el ECG se indica con círculos grises en los registros rojos y azules.

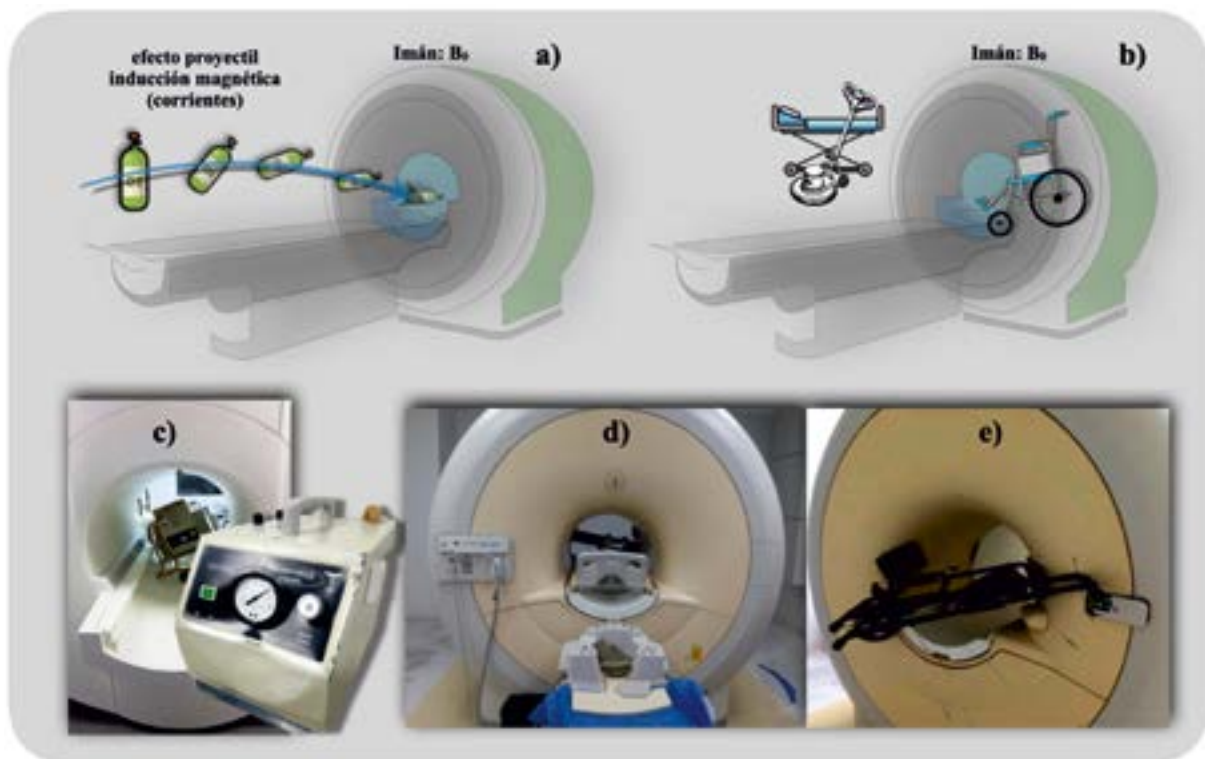
- **Movimiento del cuerpo humano:** como el latido del corazón o el movimiento ocular, que induce corrientes en los tejidos. Corrientes eléctricas del cuerpo

humano: que interactúan con las fuerzas de Lorentz, generando estimulación. Algunos de los efectos sensoriales incluyen:

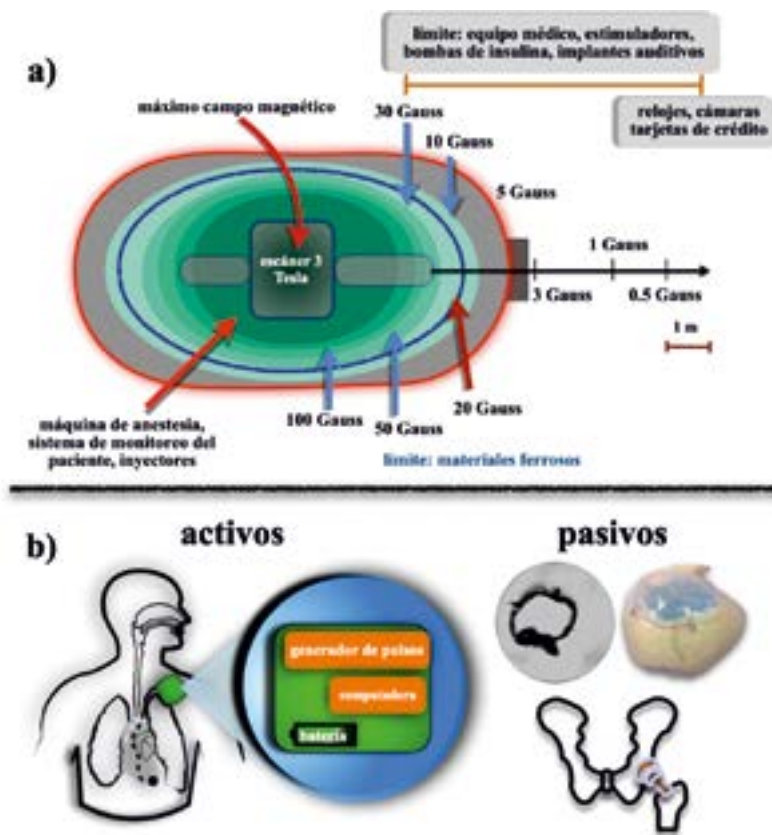
- **Magnetofosfeno:** destellos de luz causados por corrientes eléctricas inducidas en la retina o corteza visual. **Vértigo:** debido a la afectación de la función vestibular por las fuerzas de Lorentz que afectan la endolinfa en el oído interno. **Sabor metálico:** estimulación directa de nervios o electrólisis de la saliva al moverse dentro del campo magnético. **Cambios en el ECG:** alteraciones en la onda T, causadas por un voltaje inducido en el flujo sanguíneo de la aorta, un fenómeno conocido como magnetohidrodinámico. La Fig. 2 ilustra estos efectos producidos por el campo magnético  $B_0$  en una persona.

## B. Fuerza magnética de atracción

Cuando un objeto metálico se expone a un campo magnético  $B_0$ , experimenta fuerzas translacionales y rotacionales. La fuerza de atracción aumenta con la composición ferromagnética, la masa del objeto y la intensidad del campo, dependiendo de su ubicación. Este fenómeno puede compararse con el movimiento



**Fig. 3.** a) Muestra la fuerte atracción de un tanque de oxígeno, actuando como un proyectil hacia el centro del imán.<sup>24-25</sup> b) Dispositivos y equipos médicos también experimentan una fuerte atracción.<sup>26-28</sup> Las fotografías de accidentes, como el caso de un aspirador quirúrgico en c), d) y e), muestran un incidente en el que un equipo quedó atrapado en la parte trasera del sistema de IRM. Estos accidentes pueden causar lesiones graves o incluso la muerte.



**Fig. 4.** a) Mapa del gradiente de campo magnético para un sistema de 3 Tesla donde se muestra los límites de seguridad para diferente equipos, dispositivos de uso clínico y otros objetos de uso personal.<sup>23</sup> b) El esquema genérico de un implante activo se encuentra a la izquierda.<sup>11</sup> Dos ejemplos de implantes pasivos se muestran a la derecha: en la parte superior aparece un implante para craneo y junto mostramos una imagen por RM,<sup>38</sup> en la parte inferior se representa un esquema de un implante para cadera.

de un proyectil.<sup>20-23</sup> La Fig. 3 muestra esquemas y fotografías de accidentes causados por la atracción de objetos y equipos comunes en la IRM.

El campo de acción de  $B_0$  o *stray field* se extiende considerablemente desde el imán, lo que representa un riesgo tanto para el personal clínico como para los pacientes, habiendo causado lesiones e incluso fallecimientos. Estos accidentes suelen ocurrir dentro del cuarto del imán y pueden dañar equipos electrónicos adyacentes.<sup>29-31</sup> Para mitigar estos efectos, los sistemas de IRM emplean antenas de blindaje o láminas metálicas de acero. La línea de 0.5 mT (5 Gauss) se utiliza para definir las áreas de seguridad para equipos electrónicos y materiales ferromagnéticos no compatibles. La Fig. 4.a) muestra un mapa del gradiente magnético de un equipo de 3 T, útil para determinar zonas de seguridad.

Es importante mencionar que este tipo de mapas se deben calcular para cada equipo de IRM que se manufactura, y deben ser de acceso abierto para el personal médico y técnico donde se encuentre funcionando.<sup>11,20,32</sup>

### C. Interacción con implantes activos y pasivos

En los estudios de Imagen por Resonancia Magnética (IRM), los pacientes están expuestos a campos electromagnéticos de radiofrecuencia (RF), cuya energía absorbida por los tejidos se cuantifica mediante la Tasa de Absorción Específica (SAR, por sus siglas en inglés).<sup>32-39</sup> Este parámetro, definido como la potencia absorbida por unidad de masa de tejido y medido en vatios por kilogramo [W/kg], establece el límite máximo permitido de exposición para garantizar la seguridad del paciente y prevenir el calentamiento excesivo de los tejidos. La presencia de implantes médicos introduce consideraciones de seguridad críticas. En el caso de implantes activos, como marcapasos, desfibriladores o estimuladores cerebrales profundos, generalmente se contraindica el estudio para evitar riesgos severos como el movimiento del dispositivo, su mal funcionamiento o el daño tisular por calentamiento localizado.

Por su parte, los implantes pasivos (como tornillos, placas o prótesis articulares) también conllevan ries-

gos, principalmente de calentamiento inducido, que puede causar quemaduras, especialmente en pacientes bajo anestesia que no pueden reportar sensación de calor. Además, las fuerzas magnéticas pueden alterar la posición del implante.

Como se ilustra en la Fig. 4.b, que muestra los componentes básicos de implantes activos y pasivos, la interacción con el campo magnético es compleja. Por estas razones, se deben implementar protocolos extremos de seguridad<sup>39,40</sup> que incluyan la verificación previa de cualquier implante y la evaluación beneficio-riesgo para cada caso, con el fin de proteger integralmente al paciente.

### 3. Subsistema de radio frecuencia

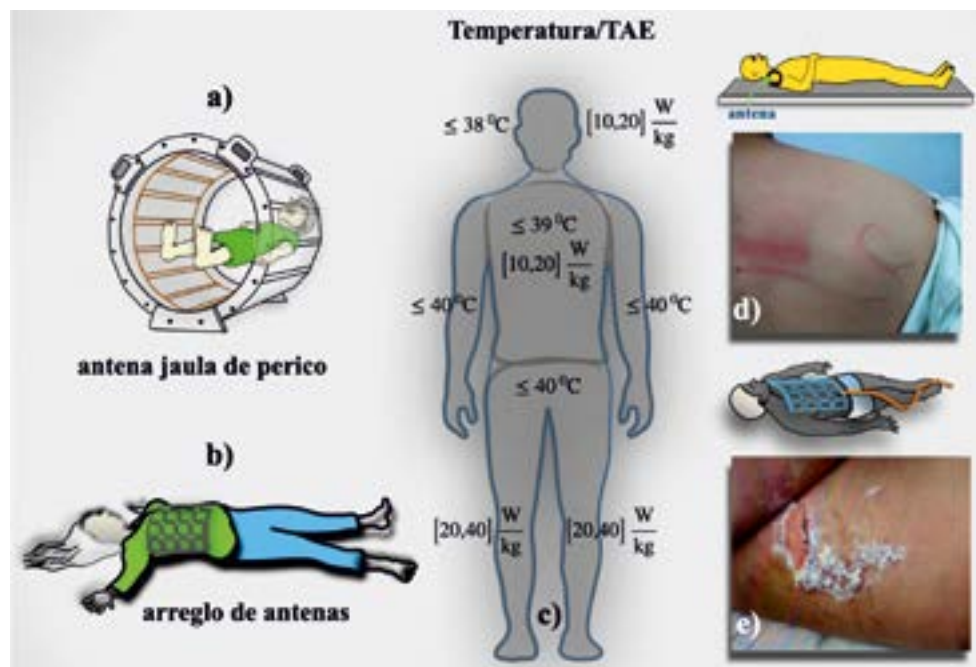
#### A. Antenas de radio frecuencia

Los campos magnéticos  $B_1$ , generados por las antenas de radiofrecuencia (RF), alteran la magnetización de la muestra y reciben las señales resultantes.<sup>16-17</sup> Parte de la energía transmitida es absorbida por el tejido, lo que provoca su calentamiento a una tasa específica de energía (TAE).<sup>11</sup> Las antenas RF se clasifican en dos tipos: de superficie y de volumen. Las de superficie son elementos unitarios que conforman arreglos que pue-

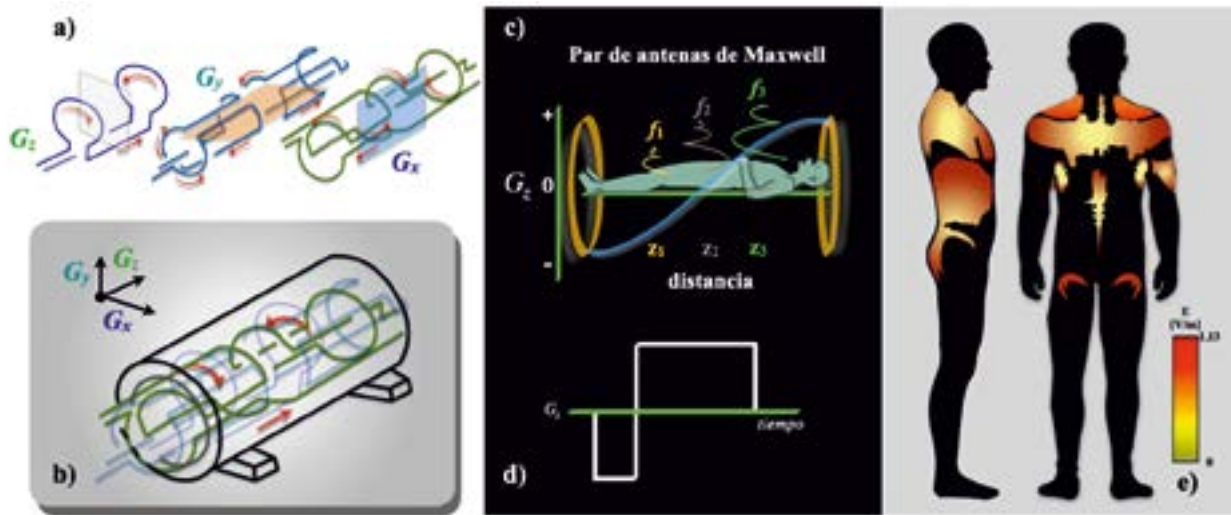
den ser planos o volumétricos. La Fig. 5.a) y b) muestra ejemplos de antenas de volumen y sus arreglos. Aunque existen diversas antenas RF clínicas, aquí se presentan solo dos tipos generales. El cálculo del TAE y el aumento de temperatura causado por las antenas RF es crucial para garantizar la seguridad del paciente en el entorno clínico. Sin embargo, las valoraciones numéricas actuales del TAE y la temperatura aún no han sido validadas experimentalmente de manera confiable.<sup>11</sup>

El TAE y la temperatura generados por las antenas RF dependen no solo del tipo de antena, sino también de la secuencia de pulsos, la región de la imagen y los parámetros de adquisición (como tiempos de repetición y eco, y tamaño de la región de interés). Se han establecido límites generales de TAE y temperatura para el uso clínico, como se muestra en la Fig. 5.c).

Sin embargo, la energía no se distribuye de manera uniforme, y los tejidos tampoco lo son, lo que puede causar que el TAE y la temperatura superen estos límites en puntos específicos, lo que puede resultar en quemaduras de hasta tercer grado.<sup>37</sup> El acoplamiento entre la antena de cuerpo entero y las antenas RF, junto con los cables que conducen las corrientes, son las principales causas del aumento de temperatura. Esto se agrava con el uso de dispositivos como monitores o electrocardiogramas, y ciertas prendas de vestir. La Fig. 5.d) y e) muestran casos de quemaduras por diversos motivos.



**Fig. 5.** a) Ilustraciones de antenas RF más comunes empleadas en la práctica clínica: a) antena volumétrica y b) arreglo de antenas.<sup>36</sup> c) Mostramos los niveles máximos permitidos de TAE y temperatura para preservar la integridad física del paciente.<sup>7,11,20,22</sup> Dos casos de quemaduras ocasionadas por un par de antenas flexibles y el cable de un arreglo de antenas se muestran en (d) y (e), respectivamente. Fotografías de las quemaduras producidas por el par de antenas flexibles se muestra en (d) y el cable del arreglo de antenas en (e).



**Fig. 6.** a) Bobinas de gradiente de campo en las tres direcciones usuales.<sup>33</sup> b) Esquema del arreglo de las bobinas de gradiente dentro del imán. c) Dependencia de la frecuencia según la posición en un par de antenas de Maxwell.<sup>9,15</sup> d) Gráfico de la intensidad del gradiente de campo magnético en función del tiempo.<sup>34</sup> e) Regiones del cuerpo humano donde se simula el campo eléctrico debido a las bobina de gradiente magnético.

### B. Sistema de bobina de gradiente

Los sistemas de IRM utilizan gradientes de campo para espacializar las señales de imagen.<sup>21,29</sup> Estos gradientes, que operan a frecuencias en kHz, generan corrientes de alta intensidad que cambian rápidamente, requiriendo un sistema de enfriamiento para disipar el calor. Los gradientes de campo  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ , cambian su polaridad para diferenciar las posiciones de las señales. La Fig. 6.a) muestra los tres gradientes

en diferentes direcciones, mientras que la Fig. 6.b) presenta su disposición en el imán. La Fig. 6.c) ilustra la dependencia espacial del gradiente  $G_z$  y la Fig. 6.d) muestra su relación con el voltaje y la duración. Estos gradientes inducen campos eléctricos que pueden causar estimulación nerviosa periférica en áreas como la nariz, la frente, los brazos, las manos, la cabeza y el esternón.<sup>11,20</sup> La Fig. 6.e) muestra esquemáticamente las zonas de estimulación reportadas. Estas regiones se obtuvieron haciendo uso de modelos anatómicos de



**Fig. 7.** Límites para ruido acústico establecidos por la Organización Mundial de la Salud y la Comisión Internacional Electrotécnica.<sup>12, 35</sup>

Zygote Media Group (hombre: 176 cm/81.6 kg; mujer: 162.6 cm/52.6 kg) convirtiéndolos en modelos aptos para simulaciones electro magnéticas con 21 tipos de tejido y aproximadamente 1900 trazas nerviosas simplificadas, simulando luego los campos electromagnéticos mediante la herramienta comercial de Sim4Life (malla hexaédrica de 1 mm, 1A @ 1kHz) para analizar los efectos de las bobinas de gradiente, evaluando formas de onda trapezoidales/sinusoidales (rampas de 100-1000  $\mu$ s) y escalando umbrales de estimulación periférica nerviosas de simulaciones con 16 pulsos a equivalentes experimentales con 128 pulsos (reducción basada en datos del modelo SAFE). Estudiamos dos orientaciones corporales: posición cefálica (decúbito supino con la cabeza hacia adelante) o posición cardíaca (centrada en el corazón). Estas simulaciones están desarrolladas para secuencias de pulsos ultra rápidas.

En el músculo se pueden apreciar campos eléctricos de mayor intensidad que en la grasa.<sup>11</sup> La estimulación en el corazón ocasionada por los campos eléctrico es otro asunto de suma importancia.

Para el caso del cerebro, los campos eléctricos presentan una menor influencia, que probablemente se deba a que su diámetro es menor que el del torso.

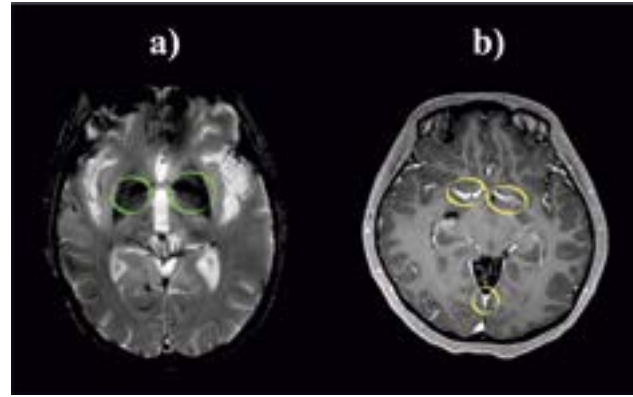
#### 4. Ruido acústico

Las bobinas de gradientes generan corrientes intensas que provocan movimientos mecánicos a frecuencias audibles, creando ruido que varía según el protocolo de imagen.<sup>35</sup> Este ruido es absorbido por el conducto auditivo, los huesos y por una onda termoacústica.<sup>40-42</sup> Es crucial proporcionar protección para evitar daños al paciente y al personal expuesto. La protección auditiva es especialmente importante, ya que el ruido se percibe principalmente a través del oído, y luego se transmite por los huesos. La Fig. 7 muestra los límites acústicos permitidos en diferentes condiciones.

Sin embargo, el efecto termoacústico sucede, cuando se expone al paciente a niveles altos de la tasa de absorción de energía (TAE) producidos por las antenas de RF, y de manera simultánea las bobinas de gradientes operan. Algunos efectos ocasionados por el ruido acústico está el tinnitus y mareo, aunque usualmente se reporta con mayor frecuencia tinnitus que mareo.<sup>42</sup>

#### 5. Agentes de contraste

El uso de agentes de contraste, como el gadolinio, es común en el diagnóstico de patologías como cáncer, angiografía y estudios de perfusión.<sup>43</sup> Aunque el gadolinio es tóxico por sí solo, su combinación con otros ele-



**Fig. 8.** Imágenes cerebrales: a) paciente con parkinson que muestra una acumulación de óxido que se manifiesta como una pérdida de señal indicado con los círculos verdes. b) imágenes contrastadas con gadolinio y las zonas de acumulación se indican con los círculos amarillos. Se empleó una secuencia gradiente eco del tipo FLASH (fast low-angle shot) con adquisición en paralelo, para estudios en tejido suave e imágenes vasculares. Imágenes cortesía del Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía Manuel Velasco Suárez, CdMx, México.

mentos lo hace seguro, y se elimina de forma renal. Sin embargo, en pacientes con insuficiencia renal, puede causar fibrosis sistémica nefrótica y daño a órganos. Además, estudios recientes han detectado residuos de gadolinio en el cerebro. Una alternativa son los agentes de contraste basados en nanopartículas de óxido de hierro, que tienen una trayectoria metabólica bien conocida y generan contrastes diferentes, con el óxido de hierro produciendo hipointensidades.<sup>44</sup> Se deben tomar precauciones extremas, ya que algunas personas pueden tener reacciones anafilácticas graves. La Fig. 8 muestra imágenes cerebrales con este agente de contraste.

#### 6. Delimitación y control de zonas en IRM

El imán de un sistema de IRM está siempre activo, lo que requiere medidas de seguridad estrictas en el cuarto donde se encuentra y las áreas circundantes. Los riesgos afectan tanto a pacientes, profesionales médicos, como a personal ocasionalmente expuesto a los campos electromagnéticos. Para proteger la integridad física, las áreas se dividen en cuatro zonas (I-IV), siendo la zona I la menos restringida y la IV la más estricta.<sup>11</sup> La Fig. 9 muestra una descripción gráfica de estas zonas.

- **Zona I:** Acceso libre a todas las personas. Usada para ingresar a zonas restringidas.
- **Zona II:** Área intermedia donde se recibe al paciente, se le entrevista y se prepara para ingresar a la

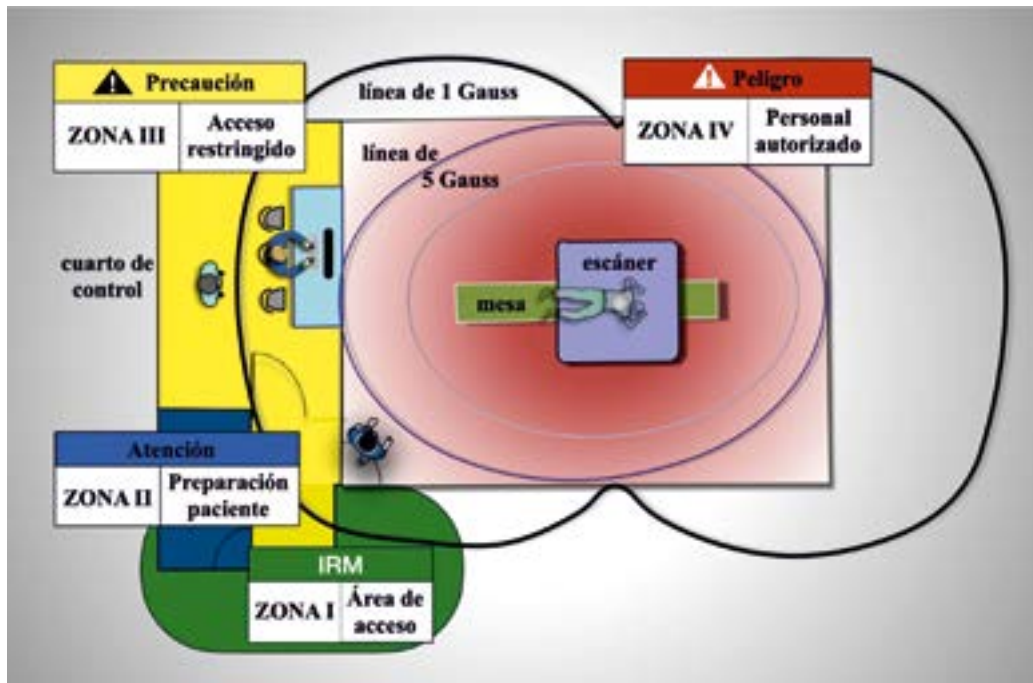


Fig. 9. Áreas demarcadas por colores donde se encuentra el sistemas de IRM y las correspondientes medidas de seguridad.<sup>10,20,23,29</sup>



Fig. 10. Señalización estándar para colocar en la puerta de acceso al cuarto del imán (Zona 4 de la Fig. 9) en (a) y (b). Esta información está basada en material producido por el Instituto de Física e Ingeniería en Medicina (Institute of Physics and Engineering in Medicine: [www.ipem.ac.uk](http://www.ipem.ac.uk)). c) Etiquetado para los dispositivos empleados con los sistemas clínicos de IRM de acuerdo a su compatibilidad.

zona de IRM. Se recomienda supervisión continua del paciente.

- **Zona III:** Incluye el cuarto de control de IRM. Representa un riesgo para personas con objetos ferromagnéticos (como llaves, teléfonos o joyería). Solo personal capacitado debe acceder, y se requieren medidas de seguridad como puertas con alarma y detectores de metales (Fig. 9). La línea de 5 Gauss debe estar idealmente dentro del cuarto de control, aunque esto no siempre es posible.
- **Zona IV:** Área de mayor riesgo, donde se requiere un control estricto del personal y los pacientes para evitar accidentes (Fig. 9).

## A. Etiquetado de equipos

Es crucial clasificar los equipos y productos que ingresan a las zonas de un sistema de IRM. El uso de equipos y accesorios ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas, lo que requiere normas que aseguren su compatibilidad y seguridad tanto para el paciente como para el personal médico. La Fig. 10.c) muestra el etiquetado utilizado para clasificar estos equipos.

## 7. Personal ocupacionalmente expuesto y otras personas

Según el Colegio Americano de Radiología (ACR), hay tres niveles de personal expuesto a la IRM:

- **Nivel 1:** Personal con capacitación mínima sobre seguridad, que puede transitar entre Zonas III y IV bajo supervisión de personal de Nivel 2. Incluye servicios generales, enfermeras y anesthesiólogos.
- **Nivel 2:** Personal con capacitación avanzada en seguridad y operación de IRM, como radiólogos especialistas y técnicos radiólogos especializados. Personas en general: Incluye a quienes no han recibido capacitación, como los pacientes. Todo el personal y los pacientes deben ser entrevistados antes del examen para identificar dispositivos activos, prótesis, objetos paramagnéticos, etc (Fig. 10.a). Se recomienda que los pacientes cambien su ropa para evitar accidentes por materiales metálicos. Además, en emergencias, el quench<sup>11</sup> libera criogénicos para evitar daños por presión interna del imán, lo que podría causar asfixia si los gases desplazan el oxígeno en el cuarto (Fig. 4).

Por otro lado, la Directiva 2013/35/UE protege a los trabajadores de los riesgos por exposición a campos electromagnéticos, exigiendo evaluaciones de riesgos, límites de exposición y medidas preventivas. Su objetivo

es garantizar un entorno laboral seguro, especialmente en sectores con contacto directo con estos campos, siguiendo el principio de precaución, aunque los efectos sobre la salud aún no están completamente claros. Los sistemas de IRM más recientes emplean la tecnología de imán seco, de tal suerte que no se requiere un tubo para el quench (quench pipe) reduciendo de esta manera los peligros asociados al quench.

## 8. Embarazo e IRM

Hasta el presente día, no se cuenta con la evidencia sólida y reproducible para asegurar que existe un daño al feto y/o a la madre, como consecuencia de haberse realizado un estudio con IRM. Tampoco existen pruebas contundentes de que se produzca daño por los altos niveles de ruido producidos por el sistema de IRM en un estudio rutinario (ver Fig. 7).<sup>11</sup> El Colegio Americano de Radiología (ACR: American College of Radiology)<sup>31</sup> indica que se debe proceder con precaución, especialmente en el primer trimestre del embarazo y evaluar siempre los riesgos/beneficios de la paciente.<sup>25</sup> De cualquier forma se sugiere hacer una análisis de riesgo beneficio para cada paciente al que se pretenda hacer un estudio con IRM.<sup>30</sup>

## 9. Recursos

La IRM avanza rápidamente, lo que requiere la actualización constante de los lineamientos de seguridad para proteger la integridad del paciente.<sup>9,17, 21</sup> Los nuevos dispositivos, tanto activos como pasivos, deben ser evaluados por los técnicos radiólogos responsables de operar estos sistemas.<sup>22</sup> Organizaciones como el American College of Radiology (radiologyinfo.org),<sup>31</sup> American Society of Radiologic Technologists (www.asrt.org), y International Society for MR Radiographers & Technologists (www.ismrm.org) establecen las normas de seguridad y capacitación. Además, sitios como mrisafety.com actualizan regularmente las listas de dispositivos compatibles con la IRM (Fig. 10.c).

## 10. Incidentes de seguridad no reportados

El registro de incidentes relacionados con el uso de la IRM en entornos clínicos es crucial para proteger la integridad del paciente y del personal médico. Sin embargo, carecemos de un sistema confiable para documentar estos incidentes ni analizar sus causas y consecuencias.<sup>45</sup> Es una práctica común no llevar un registro formal de incidentes relacionados con la exposición a campos electromagnéticos, imanes, agentes de contraste, prótesis, ruido acústico, entre otros. La

información disponible sobre estos incidentes suele ser anecdótica o provenir de comentarios informales entre el personal expuesto, ingenieros y pacientes. Esta falta de registro se debe a varios factores, como la disponibilidad limitada de información y políticas internas de hospitales y clínicas.<sup>45-46</sup> Consideramos que la recopilación de estos datos es una tarea de investigación independiente, dada su complejidad. Sin embargo, algunos hospitales implementan sistemas de notificación interna para mejorar la seguridad del paciente, como el SiNASP (Sistema de Notificación y Análisis de Seguridad del Paciente), que recopila y analiza eventos cerrados anualmente, y el SINEA (Sistema de Notificación de Incidentes y Eventos Adversos), diseñado para registrar y gestionar incidentes. Estas herramientas permiten identificar riesgos, aprender de los errores y aplicar medidas preventivas, fomentando una cultura de seguridad que reduce eventos adversos y mejora la calidad de la atención médica.

## 11. Conclusiones

La exposición a los campos electromagnéticos generados por los sistemas de IRM produce efectos específicos en el cuerpo humano, lo que requiere un conocimiento profundo de los principios físicos que rigen su funcionamiento. Este conocimiento, junto con la experiencia clínica, es fundamental para desarrollar una cultura de seguridad que proteja la integridad física y emocional del paciente. Además, ayudará a establecer lineamientos que promuevan buenas prácticas médicas y garanticen la seguridad de los profesionales y técnicos involucrados. A medida que la tecnología de IRM continúa avanzando, es crucial sentar las bases de esta cultura de seguridad, beneficiando tanto a los pacientes como a los profesionales de la salud y al sector administrativo.

## 12. Recomendaciones

La seguridad en IRM se puede beneficiar de las siguientes recomendaciones:

Comprensión de los principios físicos: a) mecanismos de interacción tejido-campo magnético, b) parámetros técnicos que determinan la exposición (intensidad, frecuencia, duración) y c) límites de seguridad establecidos por normativas internacionales. Desarrollo de una cultura de seguridad integral: a) para pacientes: minimización de riesgos físicos y manejo de ansiedad asociada al procedimiento, b) para profesionales: protocolos de protección ocupacional y formación continua y c) para la institución: Implementación de guías de buenas prácticas basadas en evidencia. Adaptación a los avances tecnológicos: a) evaluación continua

de nuevos equipos y secuencias, b) actualización de protocolos según últimos estándares (IEC: International Electrotechnical Commission, FDA: Food and Drugs Administration), y c) integración de enfoques multidisciplinarios (física médica, ingeniería biomédica, radiología). Finalmente, la gestión proactiva de estos aspectos no solo optimiza la seguridad operacional, sino que también: a) eleva la calidad asistencial, b) reduce incidentes adversos, y c) fortalece la confianza institucional. En la era de la IRM de ultra-alto campo (> 7 T), la sinergia entre conocimiento técnico y práctica clínica segura se convierte en un imperativo ético y profesional.

## 13. Agradecimientos

Los autores deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento al T. R. Víctor Hugo Gallegos por su valiosa contribución con las imágenes presentadas en la Fig. 8, cuya calidad y detalle han enriquecido significativamente el contenido de este trabajo. Asimismo, extendemos nuestro agradecimiento al Dr. Fabián Vázquez de la Rosa por su generosa colaboración al proporcionar las fotografías que ilustran la Fig. 5.d) y e), las cuales han sido fundamentales para complementar la investigación presentada.

## 14. Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés en relación con este estudio.

## Bibliografía

1. Xia, Y. Essential Concepts in MRI: Physics, Instrumentation, Spectroscopy and Imaging. John Wiley and Sons Ltd, Nueva York, 2022.
2. <https://www.mrieducation.com/>
3. Yousaf T, Dervenoulas G, Politis M. Advances in MRI Methodology. *Int Rev Neurobiol.* 2018;141:31-76. <https://doi.org/10.1016/bs.irm.2018.08.008>.
4. <https://www.medscape.org/sites/advances/mri>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=8dEiTFkwmbY>
6. Tsai LL, Grant AK, Morteale KJ, Kung JW, Smith MP. A Practical Guide to MR Imaging Safety: What Radiologists Need to Know. *Radiographics.* 2015;35:1722-1737. <https://doi.org/10.1148/rg.2015150108>
7. Hartwig V. Engineering for safety assurance in MRI: analytical, numerical and experimental dosimetry. *Magn Reson Imaging.* 2015;33:681-689. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2015.02.001>.
8. Dempsey MF, Condon B, Hadley DM. MRI safety review. *Semin Ultrasound CT MR.* 2002;23:392-401. [https://doi.org/10.1016/s0887-2171\(02\)90010-7](https://doi.org/10.1016/s0887-2171(02)90010-7).

9. Panych LP, Madore B. The physics of MRI safety. *J Magn Reson Imaging*. 2018;47:28-43. <https://doi.org/10.1002/jmri.25761>.
10. U.S. federal safety standards, guidelines and regulations for MRI systems: An overview. *Appl Radiol*. 2015. <https://appliedradiology.com/articles/u-s-federal-safety-standards-guidelines-and-regulations-for-mri-systems-an-overview>.
11. Shrivastava D, Vaughan JT. (Eds.). (2020). *Safety and Biological Effects in MRI*. John Wiley & Sons, Capítulo 7, pp. 95-118 (IV) y Capítulo 11, pp. 55-65 (III.b).
12. <https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/magnetic-resonance-imaging-mri>.
13. [https://www.rcr.ac.uk/sites/default/files/cib\\_mri\\_equipment\\_report.pdf](https://www.rcr.ac.uk/sites/default/files/cib_mri_equipment_report.pdf).
14. Serai SD, Ho ML, Artunduaga M, Chan SS, Chavhan GB. Components of a magnetic resonance imaging system and their relationship to safety and image quality. *Pediatr Radiol*. 2021;51:716-723. <https://doi.org/10.1007/s00247-020-04894-9>.
15. Winkler SA, Schmitt F, Landes H, de Bever J, Wade T, Alejski A, Rutt BK. Gradient and shim technologies for ultra high field MRI. *Neuroimage*. 2018;168:59-70. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.11.033>.
16. Gruber B, Froeling M, Leiner T, Klomp DWJ. RF coils: A practical guide for nonphysicists. *J Magn Reson Imaging*. 2018 Jun 13;48(3):590-604. <https://doi.org/10.1002/jmri.26187>.
17. Kwok WE. Basic Principles of and Practical Guide to Clinical MRI Radiofrequency Coils. *Radiographics*. 2022;42:898-918. <https://doi.org/10.1148/rf.210110>.
18. Currie S, Hoggard N, Craven IJ, Hadjivassiliou M, Wilkinson ID. Understanding MRI: basic MR physics for physicians. *Post Med J*, 2013;89:209?223. <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2012-131342>.
19. Brunquell CL, Hoff MN, Balu N, Nguyen XV, Oztek MA, Haynor DR. Making Magnets More Attractive: Physics and Engineering Contributions to Patient Comfort in MRI. *Top Magn Reson Imaging*. 2020;29:167-174. <https://doi.org/10.1097/RMR.0000000000000246>.
20. Haramati N, Haramati LB. *MRI Bioeffects, Safety and Patient Management*. Editors: F. G. Shellock, J. V. Crues, III. 2nd edition, Biomedical Research Publishing Group, Los Angeles, 2022.
21. Stafford RJ. The Physics of Magnetic Resonance Imaging Safety. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2020;28:517-536. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2020.08.002>.
22. Jabejdar Maralani P, Schieda N, Hecht EM, Litt H, Hindman N, Heyn C, Davenport MS, Zaharchuk G, Hess CP, Weinreb J. MRI safety and devices: An update and expert consensus. *J Magn Reson Imaging*. 2020;51:657-674. <https://doi.org/10.1002/jmri.26909>.
23. Watson RE Jr, Tesfaldet M, Warren J, Hoff MN. MR Imaging Safety Events: Analysis and Improvement. *Magn Reson Imaging Clin N Am*. 2020;28:593-600. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2020.07.004>.
24. Pa Patient Saf Advis. 2009; 6[2]:56-62 <http://resource.nlm.nih.gov/101563474>.
25. Mittendorf L, Young A, Sim J. A narrative review of current and emerging MRI safety issues: What every MRI technologist (radiographer) needs to know. *J Med Radiat Sci*. 2022;69:250-260. <https://doi.org/10.1002/jmrs.546>.
26. Gosbee JW, Gosbee LL. Flying Object Hits MRI. Agency for Healthcare Research and Quality, US Department of Health and Human Services. 2003. <https://psnet.ahrq.gov/web-mm/flying-object-hits-mrihttps://www.nytimes.com/2001/07/31/nyregion/boy-6-dies-of-skull-injury-during-mri.html>.
27. <https://www.nytimes.com/2001/07/31/nyregion/boy-6-diesof-skull-injury-during-mri.html>.
28. <https://www.ismrm.org/mr-safety-links/mr-safety-week-2022>
29. Hartwig V, Vanello N, Giovannetti G, Lombardi M, Landini L, Santarelli MF. A novel tool for estimation of magnetic resonance occupational exposure to spatially varying magnetic fields. *MAGMA*. 2011;24:323-30. <https://www.ismrm.org/mr-safety-links/mr-safety-week-2022>.
30. Massat MB. Twenty Years of MRI Safety: A Progress Report. *Appl Radiol*. 2020;49:38-40. (<https://appliedradiology.com/articles/twenty-yearsof-mri-safety-a-progress-report>)
31. <https://appliedradiology.com/articles/twenty-years-of-mri-safety-a-progress-report>
32. ACR Manual on MR Safety 2026. <https://edge.sitecore-cloud.io/americancoldf5f-acrorgf92a-productioncb02-3650/media/ACR/Files/Clinical/Radiology-Safety/Manual-on-MR-Safety.pdf>.
33. Rodríguez AO. Principles of magnetic resonance imaging. *Rev Mex Fis*. 2004;50:272-286.
34. Davids M, Guerin B, Klein V, Wald LL. Optimization of MRI Gradient Coils With Explicit Peripheral Nerve Stimulation Constraints. *IEEE Trans Med Imaging*. 2021;40:129-142. <https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3023329>.
35. McJury MJ. Acoustic Noise and Magnetic Resonance Imaging: A Narrative/Descriptive Review. *J Magn Reson Imaging*. 2022;55:337-346. <https://doi.org/10.1002/jmri.27525>.
36. Bottomley PA. Turning up the heat on MRI. *J Am Coll Radiol*. 2008;5:853-855. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2008.04.003>.
37. Vaughn H, Declan ABL. MRI-induced deep tissue burn presenting to the emergency department. *Am J Emerg Med*. 2022;58:352.e3-352.e4. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2022.05.048>.
38. Jimenez R, Benavides A, Flores D, Hidalgo SS, Solis SE, Uribe E, Rodríguez AO. (2012, October). Magnetic resonance imaging compatibility test of a cranial prosthesis with titanium screws. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1494, No. 1, pp. 47-49). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.4764595>.
39. Seo Y, Wang ZJ. Measurement and evaluation of specific absorption rate and temperature elevation caused by an artificial hip joint during MRI scanning. *Sci Rep*. 2021;11:1134. <https://doi.org/10.1063/1.4764595>.
40. Jungmann PM, Agten CA, Pfirrmann CW, Sutter R. Advances in MRI around metal. *J Magn Reson Imaging*. 2017;46:972-991. <https://doi.org/10.1002/jmri.25708>.

41. Winkler SA, Picot PA, Thornton MM, Rutt BK. Direct SAR mapping by thermoacoustic imaging: A feasibility study. *Magn Reson Med*. 2017 Oct;78(4):1599-1606. <https://doi.org/10.1002/mrm.26517>.
42. Lin JC, Wang Z. Acoustic pressure waves induced in human heads by RF pulses from high-field MRI scanners. *Health Phys*. 2010 Apr;98(4):603-13. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181c829b5>.
43. Bonnet CS, Tóth É. Metal-based environmentsensitive MRI contrast agents. *Curr Opin Chem Biol*. 2021;61:154-169. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2021.01.013>.
44. Hao D, Ai T, Goerner F, Hu X, Runge VM, Tweedle M. MRI contrast agents: basic chemistry and safety. *J Magn Reson Imaging*. 2012;36:1060-1071. <https://doi.org/10.1002/jmri.23725>.
45. Kihlberg J, Hansson B, Hall A, Tosell A, Lundberg P. Magnetic resonance imaging incidents are severely underreported: a finding in a multicentre interview survey. *Eur Radiol*. 2022;32:477-488. <https://doi.org/10.1007/s00330-021-08160-w>.
46. Hudson D, Jones AP. A 3-year review of MRI safety incidents within a UK independent sector provider of diagnostic services. *BJR Open*. 2019;30:1:20180006. <https://doi.org/10.1259/bjro.20180006>.